

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA PARA USO EM BEBIDAS QUENTES:
PROPOSIÇÃO E ESTUDO.

por

Arthur Mallet Dias

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2017

**SISTEMA DE AQUECIMENTO SOLAR DE ÁGUA PARA USO EM BEBIDAS QUENTES:
PROPOSIÇÃO E ESTUDO.**

por

Arthur Mallet Dias

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Energia e Fenômenos de Transporte**

Orientadora: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Profa. Dra. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Prof. M.Eng. Larissa Lemos

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

À Professora Dra. Letícia Jenisch Rodrigues, pela orientação e disponibilidade.

Ao Engenheiro Luiz Francisco Schmidt Junior, da Ecolite do Brasil Industrial LTDA, pela apoio e flexibilidade no trabalho.

À minha mãe, Nívia Carvalho Ramos, pelo carinho, suporte e revisão ortográfica.

À Shirley Inês Mendes da Silva, pela ajuda e auxílio.

Ao meu irmão, Gabriel Mallet Pippi, pela compreensão com meus horários de estudo em casa e companheirismo.

À colega Maíra Nunes de Sousa, pelo suporte no aprendizado do software TRNSYS.

DIAS, A. M. **Sistema de Aquecimento Solar de Água para Uso em Bebidas Quentes: Proposição e Estudo.** 2017. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Este trabalho propõe um sistema de aquecimento híbrido, gerado por energia solar térmica e energia elétrica, cujo objetivo é a disponibilização de água quente em locais públicos, apropriada para a preparação de chimarrão, bebida popular no sul da América Latina. Para estudar este novo conceito, a seguinte metodologia foi utilizada: pesquisas bibliográfica e de produtos similares; definição dos parâmetros de vazão, temperatura e tecnologia do coletor solar; determinação da área coletora que maximiza a relação de custo-benefício do sistema, utilizando os resultados da fração solar obtidos no software F-Chart e avaliação do valor presente líquido de diversas configurações; avaliação do comportamento transiente do sistema, através do software TRNSYS. Os resultados obtidos mostram que a melhor configuração do sistema ocorre para área coletora de 6 m² e reservatório térmico de 300 L, onde foi obtida fração solar média-anual de 0,524 e consumo de energia elétrica de 875.012,4 kJ. Concluiu-se que o sistema é economicamente viável, com custo operacional estimado em R\$ 1.428,94 por ano, e pode contribuir para a difusão e conscientização dos benefícios decorrentes do uso da energia solar térmica.

PALAVRAS-CHAVE: aquecimento solar de água, chimarrão, f-chart, trnsys.

DIAS, A. M. **Solar Water Heating System for Hot Beverages: Proposition and Study**. 2017. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

This work studies a hybrid water heating system, powered by solar thermal energy and electricity, applied for hot water disposal in public areas, in appropriate temperature for *mate* brewing, a popular drink in the south of Latin America. In order to study this new concept, the following methodology was used: similar products analysis and bibliographic research; definitions of volumetric flow, ideal disposal temperature, and best solar collector technology; definition of the collecting area that maximizes the cost-benefit ratio of the system, by using results obtained in the F-Chart software for several configurations, together with an evaluation of the net present value of each one; and evaluation of the transient behavior of the system, on TRNSYS. The results show that a 6 m² collecting area and a 300 L thermal storage tank are the best configuration for the system, resulting in an average annual solar fraction of 0.524, and an annual auxiliary electric energy consumption of 875,012.4 kJ. Results led to the conclusion that the system is economically feasible, with an annual estimated operational cost of R\$ 1,428.94, and may contribute to spread and raise awareness of the benefits of solar thermal energy.

KEYWORDS: solar water heating, mate, f-chart, trnsys.

ÍNDICE

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	1
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4 SISTEMAS PÚBLICOS DE FORNECIMENTO DE ÁGUA QUENTE.....	4
5 METODOLOGIA	4
5.1 Sistema de Aquecimento Solar.....	5
5.2 Dimensionamento do SAS no Software F-Chart.....	5
5.3 Modelagem Econômica e Definição da Área Coletora.....	6
5.4 Avaliação do Sistema no Software TRNSYS.....	7
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	7
6.1 Definição da Área Coletora.....	7
6.2 Resultados obtidos através do software TRNSYS.....	9
7 CONCLUSÕES	11
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12

1. INTRODUÇÃO

Uma das grandes tarefas da engenharia é apresentar soluções para a crescente demanda energética da humanidade. À medida que a população mundial cresce e migra para as cidades, velhos hábitos de consumo tornam-se insustentáveis financeira e ambientalmente. No Brasil, por exemplo, cerca de 6 % de toda a eletricidade gerada no país é consumida por chuveiros elétricos, utilizados para o aquecimento da água do banho nas residências [ELETROBRAS, 2017]. Isso não apenas é caro para o consumidor, que paga a conta de energia elétrica, como tem um custo elevado para o planeta, ao aumentar as emissões dos gases causadores do efeito estufa, como é o caso do dióxido de carbono liberado pelas usinas termoeletricas, que são acionadas no mesmo horário em que os chuveiros são ligados e sobrecarregam o sistema elétrico nacional (chamado de horário de ponta).

Os hábitos culturais locais são fatores que também podem interferir nas demandas energéticas dos países. Na região sul do Brasil e da América Latina, por exemplo, a população tem o hábito consumir uma bebida quente denominada chimarrão ou mate. Ela é composta por uma cuia, espécie de xícara, uma bomba, espécie de canudo, erva-mate (*ilex paraguariensis*) moída e água quente, sem ferver, entre 60 e 80 °C. O chimarrão tradicionalmente é uma bebida coletiva, hábito derivado da tradição indígena de compartilhar a bebida em rituais comunitários. No Brasil, uma pesquisa realizada por Aguiar *et al.*, 2002, constatou que 68% dos gaúchos, como são chamadas as pessoas que nascem no Rio Grande do Sul, estado ao extremo sul do país, tem o costume de tomar a bebida e 51 % destes a ingerem diariamente, frequentemente em parques e áreas públicas.

Devido à popularidade da bebida, existem equipamentos, espécies de sistemas públicos, que fornecem água quente nos parques e praças das cidades. Estes sistemas precisam aquecer continuamente uma grande massa de água, resultando em consumo de energia elétrica excessivo e em elevado custo operacional. Isto faz com que, assim como os chuveiros elétricos, tais sistemas sejam pouco sustentáveis financeira e ambientalmente.

Sistemas de Aquecimento Solar (SAS) representam uma boa alternativa para o problema energético em questão. Conforme descrito por Struckmann, 2008, esses dispositivos absorvem a radiação solar incidente, convertem-na em calor na superfície de absorção e transferem o calor para um fluido (geralmente água), que flui através do coletor. O fluido aquecido transporta energia térmica, ou diretamente para a água, ou para um tanque de armazenamento, onde fica disponível para o uso. Ao contrário dos aquecedores elétricos, os SAS geram zero emissões de gases causadores do efeito estufa e têm custo de operação desprezível, pois o calor do Sol é abundante e gratuito.

Seguindo essa linha de raciocínio, este trabalho propõe um sistema cujo objetivo é a disponibilização de água quente em locais públicos, na temperatura de 60 °C, apropriada para o consumo de bebidas quentes como, por exemplo, o chimarrão, através de aquecimento híbrido, gerado por energia solar térmica e energia elétrica. Pretende-se assim minimizar a problemática da geração de energia de duas formas, direta e indiretamente. Diretamente, ao reduzir a quantidade de energia elétrica gasta no processo de aquecimento da água. Já a forma indireta, e talvez a mais importante, é através do seu aspecto didático, como meio de popularizar o uso da energia solar térmica no meio urbano e contribuir na difusão desta forma de energia renovável.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal a proposição e estudo de um sistema, cuja finalidade é a disponibilização de água quente em locais públicos, apropriada para a preparação de bebidas quentes. Para tanto, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar a temperatura ideal de fornecimento de água.

- b) Determinar a tecnologia de coletor solar apropriada para o sistema.
- c) Determinar a área coletora ótima, que maximiza a relação de custo benefício do sistema.
- d) Avaliar o comportamento da temperatura de saída da água em base horária.
- e) Determinar a quantidade de energia utilizada pelo sistema de aquecimento auxiliar.
- f) Determinar o custo de operação estimado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Conforme descrito por Lorenço, 2000, um sistema de aquecimento solar de água é caracterizado pela presença de quatro componentes principais: coletor solar, tubulação, reservatório térmico e sistema de aquecimento auxiliar. Os sistemas de aquecimento solar podem usar dois métodos distintos para a circulação de água nos coletores solares, passivo ou ativo. Nos sistemas ativos, a água é movimentada por uma bomba (convecção forçada). Já nos sistemas passivos, a movimentação da água ocorre por convecção natural, causada pela diferença de massa específica entre a água quente e a água fria, chamada de efeito termossifão.

O sistema de aquecimento auxiliar tem a finalidade de garantir a eficácia do SAS e complementar a energia solar. Ele entra em operação sempre que o sistema solar não é capaz de fornecer sozinho toda a energia necessária para aquecer a água na temperatura estipulada. A energia auxiliar provém da eletricidade, da lenha ou do gás. O modelo mais difundido no Brasil é o aquecedor elétrico acoplado no reservatório térmico, em que o aquecimento se dá através de uma resistência elétrica. [Lorenço, 2000]

Struckmann, 2008, descreve os coletores solares como o componente principal de um SAS, pois eles são responsáveis por recolher a energia radiante do Sol e transferi-la ao fluido em forma de calor. Existem diversas tecnologias de coletores solares. Os de placa plana, segundo Duffie e Beckman, 2013, são ideais para aplicações que requerem entrega moderada de energia, de até 100°C acima da temperatura ambiente. Além disso, estes coletores conseguem captar tanto a radiação direta, quanto a radiação difusa do sol, requerem pouca manutenção, não necessitam de rastreamento solar e possuem proteção superior de vidro, para diminuir as perdas por convecção. Resultados obtidos por Santos, 2015, indicam que o coletor de placa plana deve ser utilizado para aplicações com temperatura final entre 30 e 80 °C na cidade de Porto Alegre, RS, Brasil, pois apresentam o melhor desempenho e viabilidade econômica para o clima da região, dentre as tecnologias existentes. Os resultados obtidos pelo autor utilizam a Tabela 3.1, em conjunto com a análise do nível de transparência atmosférica média anual, para determinar a tecnologia do coletor apropriada para cada cidade do Brasil.

Dantas, 2014, explica que o F-Chart é um programa de computador que auxilia na análise e no dimensionamento de sistemas de aquecimento solar. O programa utiliza o método *f-chart*, desenvolvido por Beckman *et al.*, 1977, que fornece a fração solar de cada mês, sem que esta dependa do resultado obtido no mês anterior, com base em valores diários-médios-mensais. A fração solar obtida representa o quanto da energia total necessária para aquecer a água é fornecida pelo sol, sendo que o restante da energia é fornecido pelo sistema de aquecimento auxiliar.

Idealmente, buscaria-se a fração solar igual a 1 (um), significando que o sol supre toda a demanda de energia do sistema. Porém, uma fração solar próxima de 100% pode tornar o sistema economicamente inviável, já que o aumento da fração solar se dá em função do aumento do número de coletores solares, do volume do reservatório térmico e, conseqüentemente, do investimento inicial. Como resultado, a economia gerada pode nunca compensar o investimento inicial.

Tabela 3.1 – Faixas de aplicação para diferentes tecnologias de coletores solares.

	Coletor solar de placa aberta	Coletor solar de placa fechada	Coletor solar com tubo evacuado	Coletor solar de seção parabólica
				
Radiação KWh/m ² - dia	Recomendado para a obtenção de temperaturas*			
4,5 - 4,7	Baixa	Baixa e Média	Baixa e Média	Não Recomendado
4,7 - 5,1	Baixa	Baixa e Média	Média	Não Recomendado
5,1 - 5,3	Baixa	Baixa e Média	Média	Não Recomendado
5,3 - 5,5	Baixa	Baixa e Média	Média	Média e Alta
5,5 - 5,7	Baixa e Média	Média	Não Recomendado	Média e Alta
5,7 - 5,9	Baixa e Média	Média	Não Recomendado	Média e Alta
5,9 - 6,1	Baixa e Média	Média	Não Recomendado	Média e Alta

*Temperatura final da água: Baixa 20 a 30°C. Média 30 a 80°C. Alta > 80°C
 **Áreas sublinhadas são as mais adequadas de cada linha, de acordo com o coletor desejado

(Fonte: Santos, 2015)

Bordignon, 2016, realizou estudo no software F-Chart para obter as frações solares da instalação de SAS em quatro micro cervejarias diferentes, localizadas na cidade de Porto Alegre, RS, Brasil. Para determinar a área coletora com maior viabilidade econômica, a autora calculou a taxa interna de retorno de cada configuração.

Em extensa revisão bibliográfica, os autores Haberl e Cho, 2004, informam que o método *f-chart* é utilizado como referência para outros métodos paramétricos. Os autores também constatarem que os resultados obtidos com o F-Chart divergem de 2 % a 15 % dos resultados experimentais.

O TRNSYS [Klein *et al.*, 2014] é um programa de simulação computacional que permite a simulação transiente de diversos sistemas. Desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade de Wisconsin-Madison, originalmente para aplicações em energia solar, ele é utilizado em escala global por engenheiros e pesquisadores na validação de novos conceitos de energia, desde simples sistemas de aquecimento de água doméstico, até a simulação de prédios completos e seus equipamentos [Klein, 2014]. Os projetos no TRNSYS são diagramados na interface gráfica do programa, onde pode-se conectar diversos componentes para se formar um sistema. Os componentes são chamados de *Types* e são descritos por um modelo matemático no código do programa. Conforme explicam Duffie e Beckman, 2013, o programa dispõe de três algoritmos de integração, com escolha a critério do usuário, sendo que o mais comumente utilizado é o Método de Euler-Modificado.

Mondol *et al.*, 2007, utilizam o TRNSYS para determinar a influência da orientação e inclinação de painéis solares no desempenho de um sistema localizado na Irlanda. Lima *et al.*, 2006, descrevem uma simulação de SAS onde o tamanho do tanque e posicionamento dos painéis solares são determinados a partir dos resultados obtidos no TRNSYS. A avaliação é feita de forma a obter-se o maior Retorno de Investimento, calculado com base na tarifa de energia elétrica local. Ayompe *et al.*, 2011, apresentam uma modelagem feita no TRNSYS e validada por resultados experimentais, para um SAS em climas temperados. O sistema possui circulação forçada, painéis solares de placa plana e aquecimento auxiliar elétrico. Ao final, o autor conclui que os resultados obtidos pelo TRNSYS subestimaram a temperatura de saída do coletor em - 9,6 % e superestimaram o calor entregue pelos coletores em 7,6 % e a energia total entregue à água em 6,9 %.

Dayan, 1977, e Timma, 1985, simulam e explicam o fenômeno de estratificação do tanque de um SAS. Os resultados obtidos mostram a influência do tanque na qualidade do SAS, pois a estratificação ajuda a aumentar a eficiência da troca térmica realizada com a fonte solar ao enviar água fria do fundo do tanque para o aquecimento, enquanto a parte superior fornece água quente na temperatura determinada. Em outro estudo, Braun *et al.*, 1983, obtiveram valores

experimentais 3 % e 2 % maiores para frações solares mensais e anuais, respectivamente, do que as obtidas usando TRNSYS. Em revisão de seis publicações, feita por Haberl e Cho, 2004, é mostrado que os resultados obtidos no TRNSYS apresentam divergência de 5 % a 6 % em relação aos resultados experimentais.

4. SISTEMAS PÚBLICOS DE FORNECIMENTO DE ÁGUA QUENTE

Sistemas públicos de fornecimento de água quente, populares no sul da América Latina, são caracterizados pela presença dos seguintes componentes: tanque de armazenamento de água, sistema de aquecimento e registro ou botão de acionamento. A Figura 4.1 exemplifica este conceito e mostra a foto de um produto que tem funcionalidade similar à do sistema proposto neste trabalho. O modelo é vendido pela empresa Synergy, tem o nome comercial de ChimaHot e utiliza uma resistência elétrica para realizar o aquecimento da água.



Figura 4.1: Sistema público de fornecimento de água quente, realizado através de resistência elétrica. (Fonte: Synergy, 2017)

Estudos realizados por Rapozo *et al.*, 2016, e Castellsagué *et al.*, 2000, classificam o consumo de bebidas quentes a temperaturas acima de 65 °C como provavelmente carcinogêneas para seres humanos, podendo levar a dano das células e sequelas que resultem em câncer. Em outra análise, feita por Lubin *et al.*, 2007, a revisão bibliográfica da maioria dos estudos disponíveis sobre o tema mostrou que o risco de câncer no esôfago aumenta com a quantidade de mate consumida, com tendência estatística significativa para temperaturas acima de 65 °C.

5. METODOLOGIA

Com base na revisão bibliográfica, optou-se por um sistema que fornece água na temperatura de 60 °C, utiliza coletores solares de placa plana, com área de 1 m² por coletor, possui reservatório térmico estratificado, e é localizado na cidade de Porto Alegre, RS, Brasil. A partir destas definições, foi realizada uma modelagem paramétrica do SAS, com o objetivo de

determinar a quantidade economicamente ótima de coletores solares, realizada através do método *f-chart* e do método de análise de investimentos Valor Presente Líquido (VPL). Depois de determinado o número de coletores solares, fez-se a modelagem física transiente no software TRNSYS, para se avaliar o comportamento do sistema em base horária e se obter a quantidade e custo da energia utilizada pelo sistema de aquecimento auxiliar, para um perfil de consumo específico ao longo do dia.

5.1 Sistema de Aquecimento Solar (SAS)

Os elementos básicos de um sistema de aquecimento solar podem ser organizados em diferentes configurações, conforme descrito por Duffie e Beckman, 2013. Neste trabalho, optou-se pela utilização de um SAS com circulação forçada, tanque estratificado único, sem trocador de calor entre o tanque e o coletor, e com sistema de aquecimento auxiliar elétrico embutido no tanque de armazenamento, conforme ilustra a Figura 5.1. O sistema conta ainda com um controlador, cuja função é acionar a bomba quando a temperatura da água no tanque estiver abaixo da determinada, e um misturador, responsável por adicionar água fria à água de saída do reservatório, quando esta estiver acima da temperatura de fornecimento estipulada.

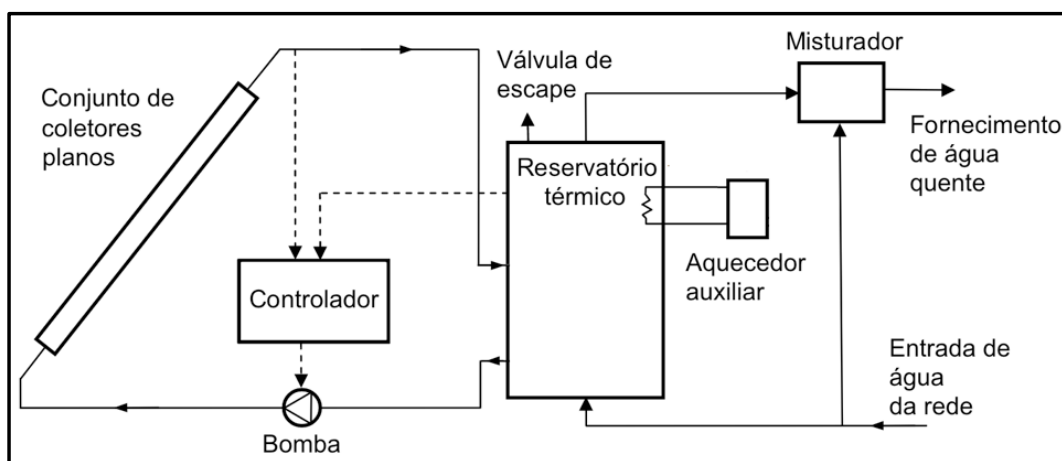


Figura 5.1: Sistema de aquecimento solar com circulação forçada, único tanque e aquecimento auxiliar elétrico.

5.2 Dimensionamento do SAS no Software F-Chart

Durante a revisão bibliográfica, não foram encontrados estudos de SAS aplicados em sistemas públicos de fornecimento de água quente, entretanto, o SAS proposto apresenta características comuns e componentes idênticos aos de um sistema de aquecimento solar de água doméstico com aquecimento auxiliar e, portanto, esta foi a opção escolhida para simulação no F-Chart.

Na simulação no software F-Chart, o sistema foi modelado como um sistema de aquecimento doméstico, em loop aberto, sem trocador de calor entre os coletores e o tanque de armazenamento e operando com vazão de $0,015 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, conforme recomenda o manual do F-Chart [Klein e Beckman, 2001]. Os coletores solares utilizados foram de placa plana, da marca Heliotek, modelo MC10 Evolution Pro, com classificação B no programa de etiquetagem do INMETRO, 2017a. Cada placa solar tem 1 m^2 de área coletora, uma camada de cobertura de vidro, coeficiente global de perdas igual a $5,787 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, eficiência energética de 57,11 % e 0,716 de eficiência ótica. A inclinação horizontal dos coletores foi fixada em 40° , com direcionamento para o norte geográfico, conforme recomendação da NBR 15569, 2008. Os

dados climáticos para a cidade de Porto Alegre, RS, Brasil provêm dos arquivos climáticos disponíveis na biblioteca do software F-Chart.

Como fluido de trabalho, o sistema utiliza água, com massa específica de 1000 kg/m³, calor específico de 4,18 kJ/(kgK), temperatura de consumo de 60 °C e vazão volumétrica de 300 L/dia. O aquecimento auxiliar é realizado por uma resistência elétrica, instalada na parte superior do tanque de armazenamento, com eficiência de 95 %. O tanque de armazenamento teve seu volume ajustado em função da área de coletores, à taxa fixa de 50 L/m². A área superficial do tanque (A_R) é calculada através da Equação 5.1, onde V é o volume do tanque. O tanque apresenta coeficiente de transferência de calor de 2,7 W/(m²K) e é constituído de aço inox nas paredes internas e externas e isolamento em poliuretano. [INMETRO, 2017b].

$$A_R = 5,812 V^{(2/3)} \quad (5.1)$$

Depois de definidos os parâmetros de entrada no software F-Chart, foram realizadas 13 simulações variando apenas o número de coletores solares, de 1 a 10 m² e, depois, utilizando 15 m², 20 m² e 30 m². Para cada caso, foram obtidas a fração solar média anual e a quantidade total de energia entregue pelo sistema à massa de água. A partir destas, foi calculada a quantidade de energia auxiliar requerida por cada configuração.

5.3 Modelagem Econômica e Definição da Área Coletora

Para determinar o número economicamente ótimo de coletores, seguiu-se a recomendação de Blank e Tarquin, 2007, e se fez a avaliação do Valor Presente Líquido (VPL) da economia solar de cada uma das 13 simulações, ao longo de 10 anos, frente ao investimento inicial necessário para cada uma. A configuração que apresentou maior VPL foi então escolhida como a configuração ótima. Conforme descrito por Beckman *et al.*, 1977, a economia solar foi considerada como a diferença entre o custo do sistema convencional e do sistema solar.

O valor de operação do sistema auxiliar foi estimado com base na energia auxiliar requerida por cada configuração, na tarifa de 0,582901 R\$/kWh, aplicada pela empresa fornecedora de energia elétrica em Porto Alegre [CEEE, 2017a], para bandeira verde. Esta tarifa é válida para comércios, poder público e residências com consumo acima de 50 kWh. Nela, estão incluídos os impostos de 30 % de ICMS e 2,89 % de PIS e COFINS [CEEE, 2017b].

Para calcular o Valor Presente Líquido de cada uma das 13 simulações, foram considerados reajuste de 4 % ao ano na tarifa de energia, baseado na projeção da inflação divulgada pelo Banco Central do Brasil em setembro de 2017, e taxa de desconto de 8,3 % ao ano, baseada na rentabilidade absoluta apresentada pela aplicação financeira “Poupança”, no ano de 2016 [BCB, 2017a e 2017b].

A modelagem econômica considerou apenas os custos de aquisição dos coletores solares, do reservatório térmico e o custo de operação do sistema de energia auxiliar. Foram desprezados os custos de operação e aquisição da bomba, de instalação e manutenção do sistema. O custo do coletor solar (C_C) foi calculado de acordo com a Equação (5.2), utilizada por Bordignon, 2016, onde se considera que existe redução no valor da compra de grandes áreas coletoras (A_C), a partir do valor unitário de R\$ 450,00, por coletor. O custo do reservatório térmico (C_R) foi calculado a partir da Equação (5.3), utilizada pela mesma autora, desenvolvida a partir de dados mercadológicos do ano de 2013.

$$C_C = 450 A_C \{0,65 + [0,35 (2^{(-A_C-1)/104})]\} \quad (5.2)$$

$$C_R = 5814 V^{0,76} \quad (5.3)$$

5.4 Avaliação do Sistema no Software TRNSYS

Uma vez definido o número de coletores, utilizou-se o software TRNSYS para modelar o sistema e avaliar o seu comportamento ao longo de um ano. Dantas, 2015, explica que o TRNSYS é utilizado na validação de pré-dimensionamentos feitos em outros programas de modelagem, como, por exemplo, o F-Chart. Além disso, serve para evitar o custo e o tempo despendidos na construção de protótipos para avaliação do comportamento de sistemas transientes. Seguindo essa abordagem, o SAS foi modelado com coletores solares planos (Type1b), reservatório térmico estratificado com aquecedor elétrico embutido (Type4c), perfil de consumo específico (Type14b), bomba de circulação forçada (Type3b), controlador (Type2b), dados meteorológicos de Porto Alegre (Type15-2) e misturador na saída (Type11h), conforme ilustra a Figura 5.2.

O horário de funcionamento do sistema foi definido com base nos resultados de pesquisa realizada com 681 pessoas sobre os hábitos de consumo de chimarrão no estado do Rio Grande do Sul, Brasil [Aguiar *et al.*, 2002]. Sendo assim, definiu-se que os 300 litros de consumo diário são distribuídos da seguinte forma durante o dia: 40 % entre às 9 e 13 horas, 40 % entre às 13 e 18 horas e 20 % entre às 18 e 20 horas.

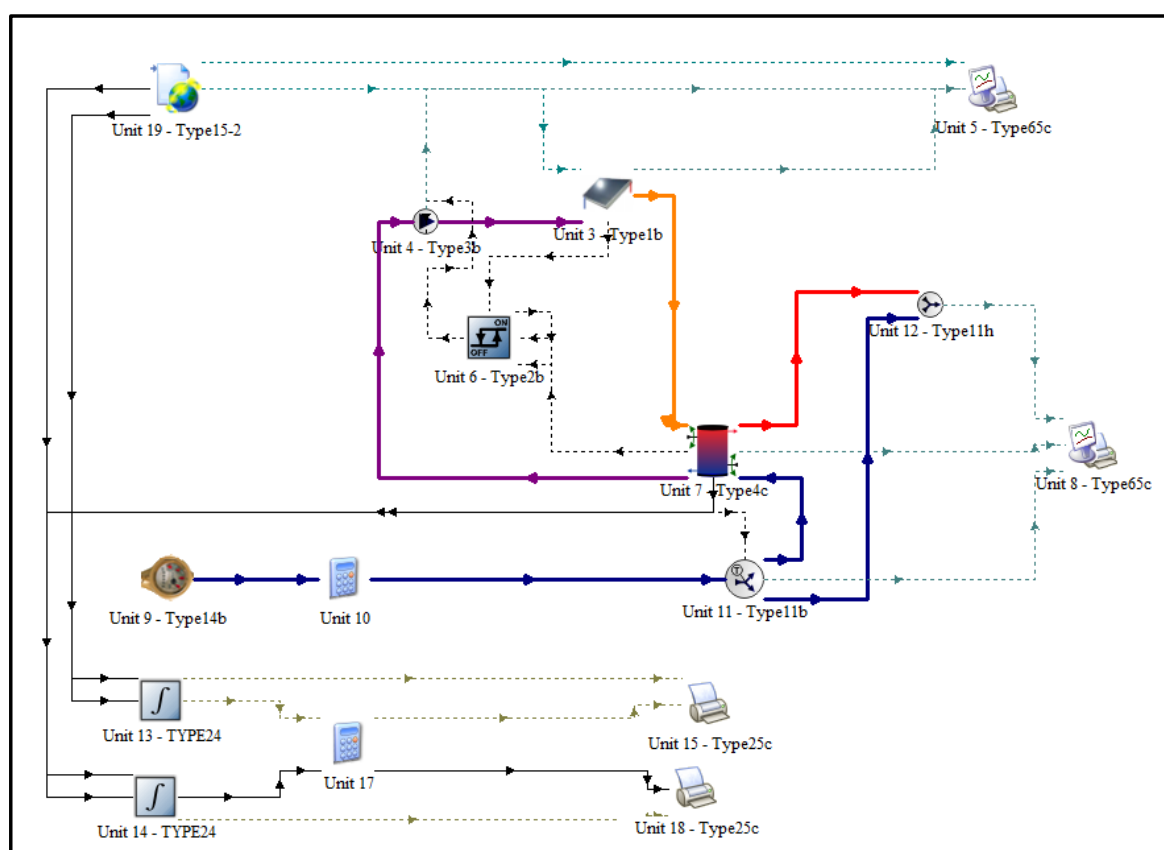


Figura 5.2: diagrama do sistema de aquecimento solar simulado no TRNSYS.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Definição da Área Coletora

Os resultados obtidos na simulação do F-Chart e na avaliação financeira são mostrados na Tabela 6.1, para cada configuração. Analisando os resultados, fica claro que o número de

seis coletores solares (6 m²), com reservatório de 300 litros, apresenta o maior VPL e, portanto, foi escolhido como a configuração ideal do sistema. Esta configuração apresentou Taxa Interna de Retorno, calculada igualando o VPL a zero, de 12,9 %. A Figura 6.1 evidencia o resultado do VPL graficamente.

Tabela 6.1 – Resultado das simulações no F-Chart e avaliação financeira

Número de Coletores	Volume do reservatório [L]	Fração solar média anual	Valor presente líquido
1	50	0,111	R\$ 893,76
2	100	0,198	R\$ 1.547,36
3	150	0,269	R\$ 2.007,11
4	200	0,329	R\$ 2.308,89
5	250	0,381	R\$ 2.472,37
6	300	0,426	R\$ 2.517,23
7	350	0,465	R\$ 2.459,67
8	400	0,500	R\$ 2.311,24
9	450	0,530	R\$ 2.083,51
10	500	0,558	R\$ 1.782,25
15	750	0,661	R\$ -565,76
20	1000	0,730	R\$ -3.868,45
30	1500	0,835	R\$ -11.060,85

O comportamento do VPL mostrado na Figura 6.2 pode ser explicado pelo fato de que o benefício incremental na fração solar para cada novo coletor adicionado diminui à medida que novos coletores são adicionados. Por exemplo, em um sistema com um coletor solar apenas, adicionar um coletor resulta em economia de energia de 11,1 %, enquanto que em um sistema que já possui 20 coletores, é necessário adicionar mais dez coletores para uma economia adicional de 10,5 %.

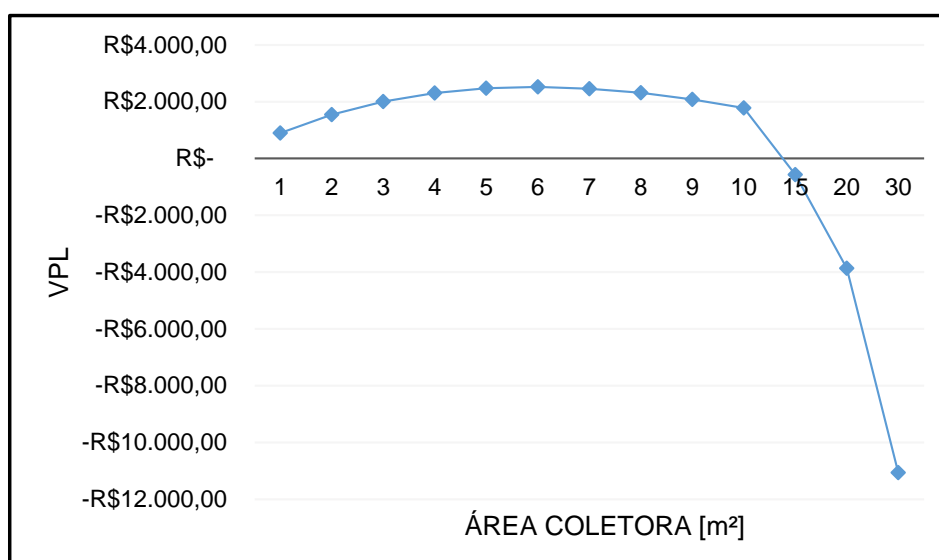


Figura 6.2: Valor Presente Líquido do SAS para diferentes áreas coletoras.

A fração solar média anual obtida (0,426) é composta pela média das frações solares de cada mês do ano. Na Figura 6.3, é possível enxergar o comportamento da fração solar ao longo

do ano, para a configuração escolhida de seis coletores. Nota-se que a fração solar atinge seu valor mínimo no mês de junho e máximo no mês de dezembro, início do inverno e verão, respectivamente, no hemisfério sul do planeta. Estes resultados significam que o sistema terá custo de operação distinto nos meses do ano.

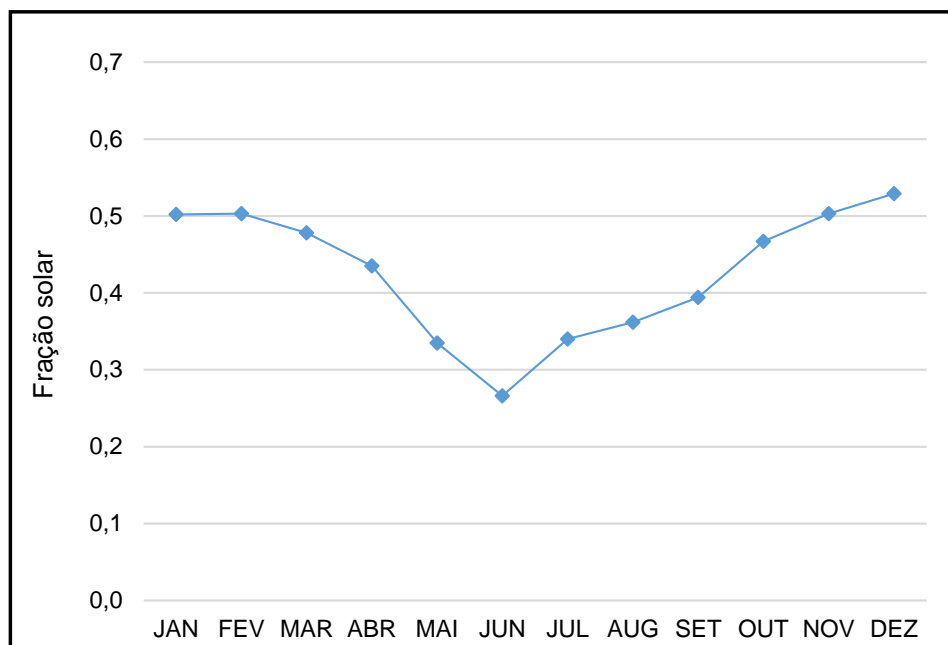


Figura 6.3: Fração solar média mensal ao longo do ano, obtida no F-Chart para área de 6 m².

6.2 Resultados Obtidos Através do Software TRNSYS

O comportamento transiente do sistema, obtido através de simulação no software TRNSYS, é mostrado para o período de um ano na Figura 6.4. Percebe-se que a curva da fração solar acompanha a curva da energia total que chega nos coletores, como era esperado, pois quanto maior a incidência de sol, maior a parcela da energia que provém do sol e menor o uso do aquecimento auxiliar. Entretanto, nota-se que a energia total que chega nos coletores é maior do que a energia que os coletores transferem para a água, fato que pode ser explicado pela perda de parte da energia que chega nos coletores, principalmente na forma de reflexão no vidro do coletor e aquecimento do ambiente em torno do coletor (convecção). Por fim, é interessante notar que a energia total de aquecimento se mantém razoavelmente constante ao longo do ano, resultado da soma das energias fornecidas pelo coletor e pelo sistema auxiliar, que se complementam, pois, quando uma aumenta, a outra diminui, e vice-versa. A Figura 6.5, mostra este último comportamento em mais detalhes.

Para as avaliações a seguir, foram selecionados os dias com maior uso de energia auxiliar (28 de junho) e o com menor uso (23 de novembro). A fração solar, a quantidade de energia requerida pelo aquecedor auxiliar e o custo estimado para cada dia são mostrados na Tabela 6.2. Nota-se que a fração solar média anual é maior do que a prevista pelo F-Chart, o que pode ser explicado pelo fato de que o TRNSYS leva em consideração os aspectos transientes da operação, como, por exemplo, distribuição da vazão total diária ao longo do dia. As temperaturas de entrada e saída dos coletores nos dois dias são mostradas na Figura 6.6, onde o sub índice “in” indica a temperatura de entrada no coletor e o sub índice “out”, a de saída. O padrão de oscilação apresentado na temperatura de saída do coletor para o pior dia do ano é típico de um dia com nuvens, onde o sol fica aparente e encoberto periodicamente, resultando em picos e vales no gráfico.

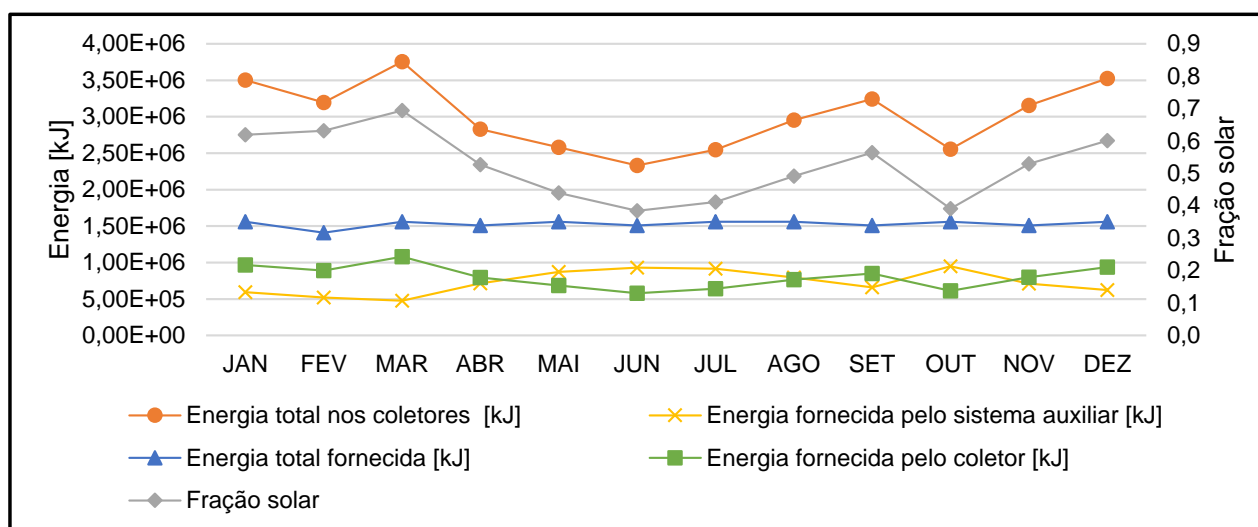


Figura 6.4: Comportamento do sistema ao longo de um ano, simulado no TRNSYS para área coletora de 6 m²

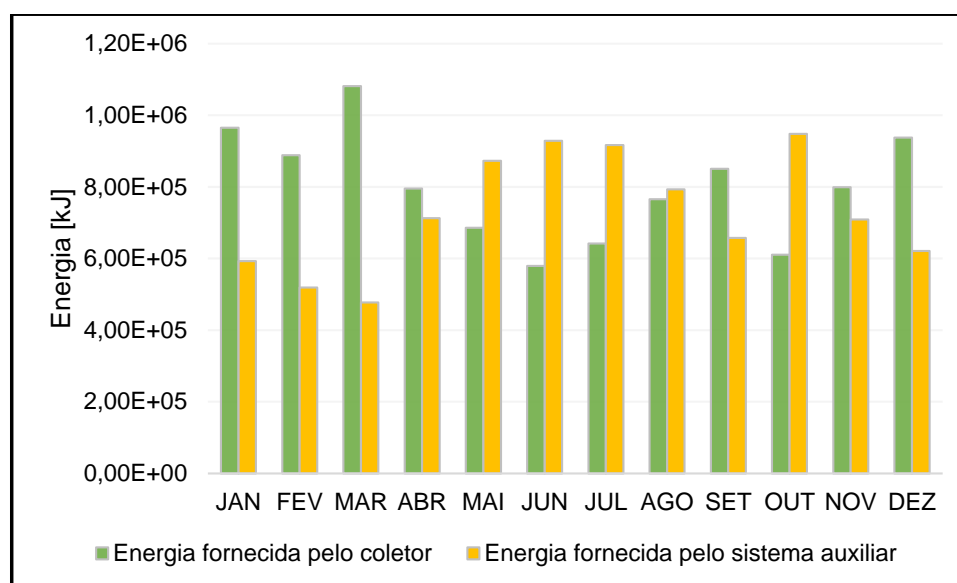


Figura 6.5: Energia mensal fornecida pelo coletor e pelo sistema auxiliar, simulado no TRNSYS para área coletora de 6 m²

Tabela 6.2 – Resultados dos dias com menor (dia 1) e maior (dia 2) uso de energia auxiliar, a partir das simulações no TRNSYS.

	Fração solar	Energia auxiliar [kWh]	Custo	
Dia 1	0,912	1,23	R\$	0,72
Dia 2	0,053	14,71	R\$	8,65
Total no ano	0,524	2.430,59	R\$	1.428,94

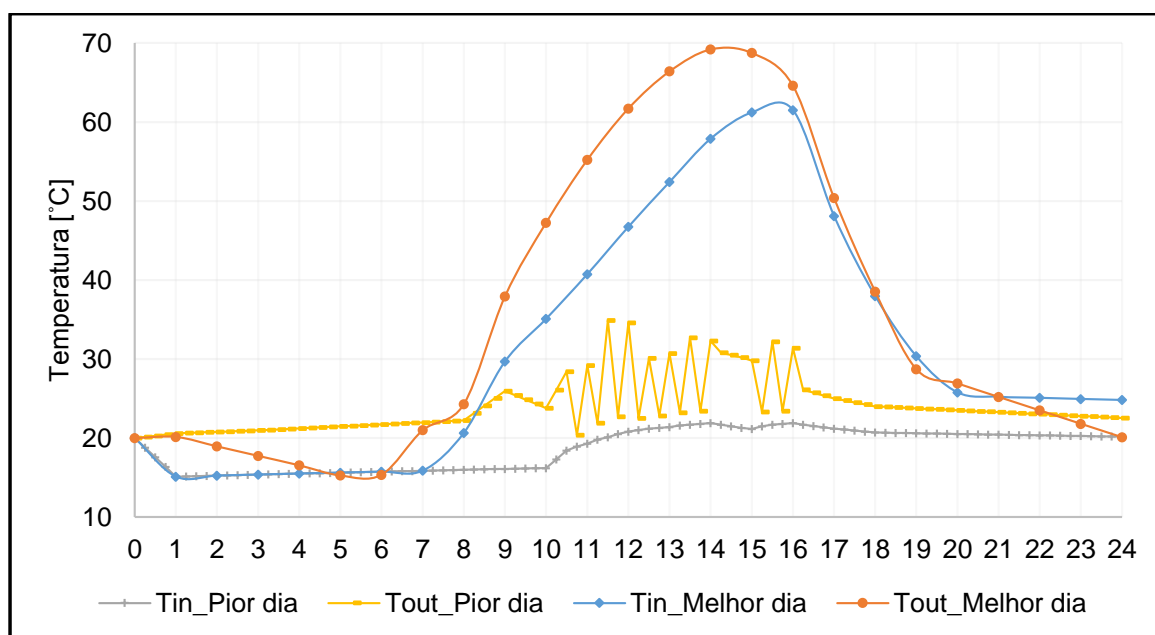


Figura 6.6: Temperatura de entrada e saída dos coletores os dias do ano com maior e menor uso de energia auxiliar, simulado no TRNSYS para área coletora de 6 m²

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizada a proposição e o estudo de um sistema de aquecimento solar de água, cuja finalidade é a disponibilização de água quente em locais públicos, apropriada para a preparação de bebidas quentes, como, por exemplo, o chimarrão. A temperatura de fornecimento de 60 °C e a utilização de coletores solares de placa foram definidas através de revisão bibliográfica. O SAS foi dimensionado no software F-Chart, com objetivo de se determinar a área coletora economicamente ótima. Posteriormente, o comportamento transiente do sistema foi avaliado no software TRNSYS para o perfil de consumo específico, para determinar a quantidade de energia auxiliar consumida e o custo estimado de operação.

Os resultados obtidos mostram que o sistema é economicamente viável e 52,4 % da demanda total da energia do sistema, com área coletora de 6 m² e reservatório térmico de 300 L, é suprida pelo Sol. Isto pode permitir a instalação de mais sistemas públicos de fornecimento de água quente nas cidades, pois reduz em mais da metade o custo operacional do sistema, estimado em R\$ 1.428,94 por ano para a configuração proposta.

O estudo realizado é pioneiro ao propor e estudar um SAS aplicado a sistemas públicos de fornecimento de água quente, com utilização híbrida de energia, solar e elétrica. O novo conceito proposto destaca-se também pelo seu aspecto didático, ao possibilitar a interação da população com uma forma prática de uso da energia solar térmica e contribuir para a difusão e conscientização dos benefícios decorrentes do seu emprego.

Estudos futuros podem utilizar este trabalho como ponto de partida no projeto de sistemas públicos de fornecimento de água quente, buscando, inclusive, otimizar os parâmetros aqui utilizados. Estes, poderiam incluir a utilização do TRNSYS para avaliar a eficiência de outras áreas coletoras na vizinhança daquela já determinada pelo F-Chart, estudar a influência da posição dos coletores no rendimento do sistema, avaliar o desempenho de outras tecnologias de coletor, ou ainda, confirmar experimentalmente os valores obtidos nas simulações aqui realizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas “**Norma Brasileira NBR 15569 – “Sistemas de Aquecimento Solar de Água em Circuito Direto”**”, 2008

Aguiar, A. M. (org). “**O Consumo de Chimarrão em Porto Alegre**”. Porto Alegre, 2002.
<http://ilexparaguariensis.pbworks.com/f/OS+HÁBITOS+DE+CONSUMO+DE+CHIMARRÃO+EM+PORTO+ALEGRE.pdf> Acesso em 19/09/2017.

Ayompe, L., Duffy, A., McCormack, S., Conlon, M. “**Validated TRNSYS Model for Forced Circulation Solar Water Heating Systems with Flat Plate and Heat Pipe Evacuated Tube Collectors.**” Applied Thermal Engineering. Vol. 31, pp. 1536-1542. 2011

BCB – Banco Central do Brasil “**Relatório de Inflação, volume 19, nº 3**”

<http://www.bcb.gov.br/htms/relinf/port/2017/09/ri201709P.pdf> Acessado em 02/10/2017a.

BCB - Banco Central do Brasil “**Remuneração dos Depósitos de Poupança**”

<http://www4.bcb.gov.br/pec/poupanca/poupanca.asp> Acesso em 02/10/2017b.

Beckman, W. A., Klein S. A., Duffie J. A., “**Solar Heating Design by the f-Chart Method**”, Wiley-Interscience, New York, 1977.

Bordignon, J. D. “**Identificação de etapas de processos de produção favoráveis ao uso de sistema solar de aquecimento de água**”. Trabalho de Conclusão de Curso. UFRGS. Porto Alegre, 2016.

Blank, L. T, Tarquin, A. “**Engenharia Econômica**” 6. ed., São Paulo, 2007.

Braun, J. E., Klein, S. A., Pearson K. A. “**An improved design method for solar water heating systems.**” Solar Energy (journal), v.31, n.6, pp 597-604. Grã-Bretanha, 1983.

Castellsagué, X., Muñoz, N., De Stefani, E., Victora C. G., Castelletto, R., Rolón, P. A. “**Influence of Mate Drinking, Hot Beverages and Diet on Esophageal Cancer Risk in South America**”. Int J Cancer; 88:658–64. 2000.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica “**Tarifas e Custos dos Serviços Vigentes a partir de 01/05/2017**”.

http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Archives/Upload/Tarifas_B-2017-11_97023.pdf Acesso em 12/11/2017a.

CEEE – Companhia Estadual de Energia Elétrica “**Tabela de Impostos**”

http://www.ceee.com.br/pportal/ceee/Component/BTFormService_PisCofins.aspx Acesso em 12/11/2017b

Dayan M. “**High Performance in Low-Flow Solar Domestic Hot Water Systems**”. Master’s thesis, University of Wisconsin-Madison, 1997.

Dantas, F. e Costa, M.A. “**Thermal and Economical Analysis of the Solar Preheating of Steam Boiler Feed Water**”. Journal of Energy and Power Engineering, v. 8, p. 775-784, maio 2014.

Duffie, J. A. e Beckman , W.A. **Solar Engineering os Thermal Processes**. Wiley, New York, 4th edition, 2013.

ELETROBRÁS; PROCEL. “**Pesquisa de Posse de equipamentos e Hábitos de Uso**”,
<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0%2D06D1%2D4FFE%2DB335%2>

[D95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BE6AA7196%2DE64E%2D4FC0%2D9567%2D994B77FB24DE%7D%3B&UIPartUID=%7B05734935%2D6950%2D4E3F%2DA182%2D629352E9EB18%7D](https://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/chuveiro.pdf). Acesso em 20/11/2017.

Haberl, J. S., Cho, S. **“Literature review of uncertainty of analysis methods (f-chart program)”**. Texas/EUA, 2004.

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **“Tabela de Consumo de Energia Elétrica - Chuveiros Elétricos”**.

<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/chuveiro.pdf>. Acesso em 20/10/2017a.

INMETRO 2017b Adicionar tabela do Inmetro para tanques de armazenamento.

Klein S.A. and Beckman W.A. **“F-CHART User's Manual”**, 1983-2001 by S.A. Klein and W.A. Beckman, 2001.

Klein S.A. (org) **“TRNSYS Program Manual”**. University of Wisconsin, 2014

Lima J. B. A., Prado R. T.A., Taborianski V. M. **“Optimization of Tank and Flat-Plate Collector of Solar Water Heating System for Single-Family Households to Assure Economic Efficiency Through The Trnsys Program”**. Renewable Energy, 2006.

Lourenço, I. **Estudo de Um Sistema de Aquecimento de Água Híbrido Gás-Solar**. Dissertação de Mestrado. PROMEC/UFRGS. Porto Alegre, 2000.

Lubin J. H., De Stefani E., Abnet C. C. **“Maté drinking and esophageal squamous cell carcinoma in South America”** Cancer Epidemiol Biomarkers, 2014.

Mondol J. D., Yigzaw, G. Y., Norton, B. **“The Impact of Array Inclination and Orientation on The Performance of A Grid-Connected Photovoltaic System”**. Renewable Energy, 2007.

Rapozo D. C., Blanco T. C., Reis B. B. **“Recurrent Acute Thermal Lesion Induces Esophageal Hyper Proliferative Premalignant Lesions in Mice Esophagus”**. 2016.

Santos R. K., Ítalo A. G. R. **“Seleção do coletor solar em sistemas brasileiros de aquecimento de água”** Acta Iguazu, Cascavel, 2015.

Struckmann, F. **“Analysis of a Flat-plate Solar Collector”**, Project Report MVK160 Heat and Mass Transport, 2008.

Timma J. **“Storage tank dynamic behavior study in Electrico-Solar DHW system”**. PhD thesis, Universite de Reims- Lab. de Thermomecanique - Service Universitaire d'Energetique, 1985.